

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-046038

(43)Date of publication of application : 16.02.1999

(51)Int.Cl.

H01S 3/18

(21)Application number : 09-285405

(71)Applicant : NICHIA CHEM IND LTD

(22)Date of filing : 17.10.1997

(72)Inventor : SANO MASAHIKO  
NAKAMURA SHUJI

(30)Priority

Priority number : 09139754

Priority date : 29.05.1997

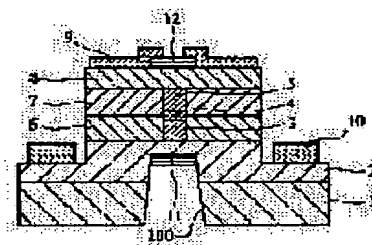
Priority country : JP

(54) NITRIDE SEMICONDUCTOR LASER ELEMENT AND MANUFACTURE OF THE SAME

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To realize the low threshold value of a laser element and single mode thereof by providing a novel structure of a surface-emitting laser, consisting of a nitride semiconductor and a method of manufacturing the same.

**SOLUTION:** An n-type nitride semiconductor layers 2, 3, an active layer 4 and a p-type nitride semiconductor layer 5 are sequentially formed on a first main surface side of a substrate, having a first main surface and a second main surface. A hole 100 is provided in the second main surface side of the substrate 1 and a first reflecting mirror 11 is provided at the bottom part of the hole 100, the outermost surface of one p-type nitride semiconductor is provided with a second-reflecting mirror 12 and the surface-emitting laser having low threshold value can be realized by realizing oscillation through the resonance of light emission of an active layer with the first reflecting mirror 11 and the second reflecting mirror 12.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 17.02.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 21.09.2004

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

3

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-46038

(43) 公開日 平成11年(1999) 2月16日

(51) Int.Cl.<sup>5</sup>

H 0 1 S 3/18

識別記号

F 1

H 0 1 S 3/18

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平9-285405

(22) 出願日 平成 9 年 (1997) 10 月 17 日

(31) 優先権主張番号 特願平9-139754

(32) 優先日 平 9 (1997) 5 月 29 日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000226057

日亜化学工業株式会社

徳島県阿南市上中町岡491番地100

(72) 発明者 佐野 雅彦

徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化

学工業株式会社内

(72) 発明者 中村 修二

徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化

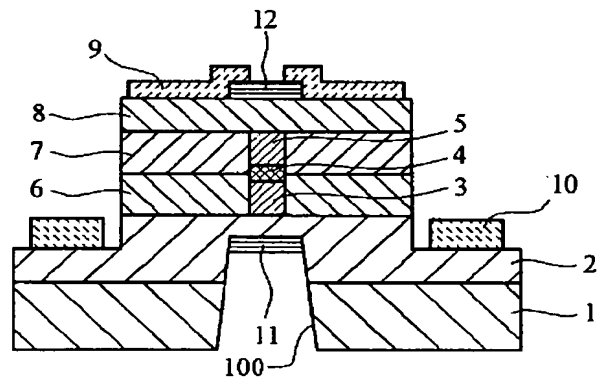
学工業株式会社内

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体レーザ素子及びその製造方法

(57) 【要約】

【目的】 窒化物半導体よりなる面発光レーザの新規な構造とその製造方法を提供することにより、レーザ素子の低閾値化、単一モード化を実現する。

【構成】 第1の主面と、第2の主面とを有する基板の第1の主面側に、n型窒化物半導体層と、活性層と、p型窒化物半導体層とを順に有し、前記基板の第2の主面側に孔が設けられて、その孔の底部に第1の反射鏡が設けられており、一方p型窒化物半導体の最表面には第2の反射鏡が設けられており、第1の反射鏡と第2の反射鏡とで活性層の発光を共振させて発振させることにより、低閾値の面発光レーザが実現できる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1の主面と、第2の主面とを有する基板の第1の主面側に、n型窒化物半導体層と、活性層と、p型窒化物半導体層とを順に有し、前記基板の第2の主面側に孔が設けられて、その孔の底部に第1の反射鏡が設けられており、一方p型窒化物半導体の最表面には第2の反射鏡が設けられており、第1の反射鏡と第2の反射鏡とで活性層の発光を共振させて発振する窒化物半導体レーザ素子。

【請求項2】 前記基板の第1の主面側にn電極が形成され、前記第2の反射鏡の形成部を除くp型窒化物半導体層の表面にはp電極が形成されており、n電極と、p電極とが同一面側にあつて、n電極がp電極の周囲を囲んでなることを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項3】 前記基板が導電性の基板であり、その基板の第2の主面側にn電極が形成され、前記第2の反射鏡の形成部を除くp型窒化物半導体層の表面にはp電極が形成され、n電極が前記第1の反射鏡の周囲を囲んでなることを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項4】 前記n型窒化物半導体層側、若しくは前記p型窒化物半導体層側の内の少なくとも一方の層側には、互いに組成が異なる窒化物半導体層が積層されてなる超格子層をクラッド層として有することを特徴とする請求項1乃至4の内のいずれか1項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項5】 第1の主面と第2の主面とを有する基板の第1の主面上に、活性層を含む窒化物半導体層を気相成長させる第1の工程と、基板の第2の主面側をエッチングして孔を設け、その孔の底部に活性層の発光を共振させる第1の反射鏡を形成する第2の工程と、前記孔の底部に対応した前記窒化物半導体層の最表面に活性層の発光を共振させる第2の反射鏡を形成する第3の工程とを備えることを特徴とする窒化物半導体レーザ素子の製造方法。

【請求項6】 前記第1の工程後、最上層の窒化物半導体層の表面に保護膜を形成して、活性層を含む窒化物半導体層をエッチングし、エッチングにより露出した半導体層表面に、電流阻止層となる窒化物半導体層を成長させる第4の工程を備えることを特徴とする請求項5に記載の窒化物半導体レーザ素子の製造方法。

【請求項7】 第4の工程後、p電極を形成すべき窒化物半導体層を電流阻止層の上に成長させる第5の工程を備える請求項6に記載の窒化物半導体レーザ素子の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は窒化物半導体 ( $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ,  $0 \leq x$ ,  $0 \leq y$ ,  $x+y \leq 1$ ) よりなるレ

ーザ素子とレーザ素子の製造方法に係り、特に面発光レーザ素子とその製法に関する。なお、本明細書において示す窒化物半導体の一般式は単に窒化物半導体の組成を示すものであつて、例えば異なる窒化物半導体層が同一の一般式で示されていても、それらの式のX値、Y値が一致した層を示すものでは決していない。

## 【0002】

【従来の技術】 窒化物半導体は高輝度青色LED、純緑色LEDの材料として、フルカラーLEDディスプレイ、交通信号等で最近実用化されたばかりである。これらの各種デバイスに使用されるLEDは、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間に、単一量子井戸構造 (SQW: Single-Quantum-Well) のInGa<sub>x</sub>Nよりなる活性層が挟まれたダブルヘテロ構造を有している。青色、緑色等の波長はInGa<sub>x</sub>N活性層のIn組成比を増減することで決定されている。

【0003】 また、本出願人は、この材料を用いてパルス電流下、室温での410nmのレーザ発振を世界で初めて発表した (例えば、Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) L74、Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) L217等)。このレーザ素子は、InGa<sub>x</sub>Nを用いた多重量子井戸構造の活性層を有するダブルヘテロ構造を有し、パルス幅2μs、パルス周期2msの条件で、閾値電流610mA、閾値電流密度8.7kA/cm<sup>2</sup>、410nmの発振を示す。さらに、我々は改良したレーザ素子をAppl. Phys. Lett. 69 (1996) 1477において発表した。このレーザ素子は、p型窒化物半導体層の一部にリッジストライプが形成された構造を有しており、パルス幅1μs、パルス周期1ms、デューティー比0.1%で、閾値電流187mA、閾値電流密度3kA/cm<sup>2</sup>、410nmの発振を示す。そして、さらに我々は室温での連続発振にも初めて成功し、発表した。 (例えば、日経エレクトロニクス 1996年12月2日号技術速報、Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 3034、Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 4056等)、このレーザ素子は20℃において、閾値電流密度3.6kA/cm<sup>2</sup>、閾値電圧5.5V、1.5mW出力において、27時間の連続発振を示す。

【0004】 既に赤外半導体レーザは通信用光源として、赤色半導体レーザはDVD光源として既に実用化されている。410nm前後の青色レーザ光源ができることにより、一気に記録容量は4倍となるため、現在数々の方面から熱心に研究が成されている。その中で、窒化物半導体レーザ素子は、今まで発表された材料の中で、最も発振波長が短く、さらに上記のように連続発振が実現されたことにより、非常に注目されている。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】 半導体レーザはストライプ型の導波路を有し、活性層端面の劈開面を共振面とされることが多く、現在実用化されている赤外、赤色半導体レーザは、ほとんどがこの型である。一方、基板に

対して垂直な方向でレーザ光が出射される、いわゆる面発光レーザも提案されている。面発光レーザは、レーザ素子の低閾値化、横モード、縦モード等を安定化させるためには非常に有用であることが知られているが、窒化物半導体レーザ素子では全く知られていない。窒化物半導体よりなる面発光レーザが実現できると、レーザビーム径を小さくすることもできるので、DVD光源としては、非常に有利である。また、光通信分野には単一モードのレーザ光が求められている。従って、本発明の目的とするところは窒化物半導体よりなる面発光レーザの新規な構造とその製造方法を提供することにより、レーザ素子の低閾値化、単一モード化を実現することにある。

#### 【0006】

【課題を解決するための手段】本発明の窒化物半導体レーザ素子は、第1の主面と、第2の主面とを有する基板の第1の主面側に、n型窒化物半導体層と、活性層と、p型窒化物半導体層とを順に有し、前記基板の第2の主面側に孔が設けられて、その孔の底部に第1の反射鏡が設けられており、一方p型窒化物半導体の最表面には第2の反射鏡が設けられており、第1の反射鏡と第2の反射鏡とで活性層の発光を共振させて発振することを特徴とする。本発明のレーザ素子において、第1の反射鏡と第2の反射鏡との距離は $5\mu\text{m}$ 以下、さらに好ましくは $2\mu\text{m}$ 以下、最も好ましくは $2\mu\text{m}$ 以下に設定することが望ましい。なお下限については特に限定しないが、1000Å以上、特に好ましくは活性層の発光波長以上に調整することが望ましい。

【0007】また本発明のレーザ素子では、前記基板の第1の主面側にn電極が形成され、前記第2の反射鏡の形成部を除くp型窒化物半導体層の表面にはp電極が形成されており、n電極と、p電極とが同一面側にあって、n電極がp電極の周囲を囲んでなることを特徴とする。

【0008】また本発明のレーザ素子の別態様では、前記基板が導電性の基板であり、その基板の第2の主面側にn電極が形成され、前記第2の反射鏡の形成部を除くp型窒化物半導体層の表面にはp電極が形成され、n電極が前記第1の反射鏡の周囲を囲んでなることを特徴とする。

【0009】本発明のレーザ素子の好ましい態様として、前記n型窒化物半導体層側、若しくは前記p型窒化物半導体層側の内の少なくとも一方の層側には、互いに組成が異なる窒化物半導体層が積層されてなる超格子層をクラッド層として有することを特徴とする。さらに、超格子層にはn型不純物若しくはp型不純物が変調ドーピングされていることが望ましい。

【0010】また本発明のレーザ素子の製造方法は、第1の主面と第2の主面とを有する基板の第1の主面上に、活性層を含む窒化物半導体層を気相成長させる第1の工程と、基板の第2の主面側をエッチングして孔を設

け、その孔の底部に活性層の発光を共振させる第1の反射鏡を形成する第2の工程と、前記孔の底部に対応した窒化物半導体層の最表面に活性層の発光を共振させる第2の反射鏡を形成する第3の工程とを備えることを特徴とする。

【0011】さらに、前記第1の工程後、最上層の窒化物半導体層の表面に保護膜を形成して、活性層を含む窒化物半導体層をエッチングし、エッチングにより露出した半導体層表面に、電流阻止層となる窒化物半導体層を成長させる第4の工程を備えることを特徴とする。

【0012】さらにまた、第4の工程後、p電極を形成すべき窒化物半導体層を電流阻止層の上に成長させる第5の工程を備えることを特徴とする。

#### 【0013】

【発明の実施の形態】図1は本発明のレーザ素子の一構造を示す模式的な断面図であり、また図2は図1のレーザ素子を第2の反射鏡12側から見た平面図である。このレーザ素子は基本的に、第1と、第2の主面とを有する基板1の第1の主面側に、n側コンタクト層2、n側クラッド層3、活性層4、p側クラッド層5とを有し、n側クラッド層3、活性層4、p側クラッド層4の周囲はn-p逆接合を有する第1の電流阻止層6と第2の電流阻止層7とで包囲されており、さらに第2の電流阻止層7とp側クラッド層5の上にはp側コンタクト層8が形成された構造を有する。一方基板1の第2の主面側は孔が設けられ、その孔の底部には活性層の発光を共振させるための第1の反射鏡11が設けられている。一方その第1の反射鏡と対面した側にあるp側コンタクト層8の表面には、同じく活性層の発光を共振させるための第2の反射鏡12が形成されている。また第2の反射鏡12の形成部分を除く、p側コンタクト層8の最表面には、p電極9がほぼ全面に形成され、一方エッチングされて露出したn側コンタクト層2の表面にはp電極9を囲むようにn電極10が形成されている。

【0014】本発明のレーザ素子では基板1の第1の主面側に窒化物半導体が積層されてなり、第2の主面側には孔100が設けられ、その孔100の底部には活性層の発光波長を反射する第1の反射鏡11が形成されている。一方基板1の第2の主面側にある最上層のp側コンタクト層8の最表面には同じく活性層の発光波長を反射する第2の反射鏡12が形成されている。このレーザ素子は活性層の発光を第1と第2の反射鏡とで共振させて、いずれか一方、若しくは両方の反射鏡側にレーザ光が出力される。

【0015】特に本発明では、基板1の第2の主面側に孔100を設け、その孔の底部に第1の反射鏡を設けている。この孔100を設けることにより、活性層の共振器長が短くなり、低閾値で発振して単一モードのレーザ光が得られやすくなる。第1と第2の反射鏡との距離は $5\mu\text{m}$ 以下、さらに好ましくは $3\mu\text{m}$ 以下、最も好まし

10

20

30

40

50

くは $2\mu\text{m}$ 以下に調整することが望ましい。下限については特に限定しないが、 $100\text{Å}$ 以上、好ましくは活性層の発光波長以上、通常は $380\text{nm}$ 以上に調整する。 $5\mu\text{m}$ よりも長いと損失が大きくなって閾値が上昇して素子寿命が短くなる傾向にある。また、 $\text{Al}$ を含む窒化物半導体は単独で厚膜が成長しにくい傾向にある。そのため、電流阻止層6、7を $\text{Al}$ を含む窒化物半導体で成長させると成長中に結晶中にクラックが入りやすくなる。結晶中に一度クラックが入ってしまうと、次に成長させるp側コンタクト層8がその層の上に成長できなくなる。従って第1と第2の反射鏡間の距離を短くするということは、電流阻止層6、7、或いはn側クラッド層3、p側クラッド層5を成長しやすくする作用もある。

【0016】第1の反射鏡11、第2の反射鏡12の材料は活性層の発光を反射させるため、例えば誘電体多層膜、金属薄膜等で形成できる。誘電体多層膜の材料としては、例えば $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 等の高誘電体材料を $\lambda/4n$  ( $\lambda$ : 活性層自然発光の発光波長、 $n$ : 誘電体の屈折率) となるような膜厚で複数層積層することにより形成できる。反射率としては60%以上、さらに好ましくは70%以上、最も好ましくは80%以上の反射率となるように設計することが望ましい。さらに第1、第2の反射鏡の面積(平面における面積)は、活性層3の面積よりも大きくすることが望ましい。活性層3の面積は $30\mu\text{m}^2$ 以下、さらに好ましくは $20\mu\text{m}^2$ 以下、最も好ましくは $5\mu\text{m}^2$ 以下に調整し、第1、第2の反射鏡の面積は活性層の面積の2倍以上にすることが望ましい。

【0017】また、図1、図2に示すように、本発明のレーザ素子では、基板1の第1の主面側(具体的にはn側コンタクト層3)の表面にn電極10が形成され、第2の反射鏡12の形成部を除くp型窒化物半導体層(具体的にはp側コンタクト層8)の表面にはp電極9が形成されて、n電極10と、p電極9とが同一面側にあって、n電極がp電極の周囲を囲んでいる。特に面発光のレーザ素子ではこのように同一面側に電極がある場合、一方の電極の周囲を他方の電極が囲む構造とすることにより、均一に電流が流れて、閾値を低下させる上で非常に効果的である。なお、図2ではn電極10の形状は矩形を有しているが、n電極形状はp電極の周囲を囲んでいれば、円形、多角形とどのような形状でも形成することができる。但し、多角形の形状とした場合、p電極9の縁部の距離と、n電極10の縁部との距離とは等しくすることが望ましい。

【0018】一方、図3では、基板に $\text{GaN}$ のような導電性基板を用いた場合のレーザ素子の構造を示している。基板に導電性基板を用いた場合は、基板の第2の主面側にn電極を形成することができる。図3に示すように、n電極10が第1の反射鏡11の周囲を囲むように

電極を形成して、n電極10とp電極9とが対向したような構造とすることにより、図2と同じく活性層に均一に電流を注入できるので、低閾値で発振する。しかも、p電極9をp側コンタクト層8の第2の反射鏡12形成部を除くほぼ全面に形成してあるので、p電極側をヒートシンクに接する側としてボンディングすると放熱性も良くなり素子寿命も向上する。なお、基板1に導電性基板を用いても図1、2に示すような同一面側に電極があるレーザ素子を作製することもできる。

【0019】次に、各層構成について説明する。基板1には、例えばC面、A面、R面を主面とするサファイア、(111)面を主面とするスピネル( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )のような絶縁性基板の他、 $\text{GaN}$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{Si}$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{GaAs}$ のような導電性(半導体)基板を用いることができ、その基板の主面の面方位は特に問うものではない。また $\text{GaN}$ のような半導体基板を用いた場合には、図3に示す構造のレーザ素子もできる。

【0020】n側コンタクト層2はn電極を形成して電流を注入する層であり、n型窒化物半導体で構成することができる。通常は、n型不純物をドーパした $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$  ( $0 \leq x$ ,  $0 \leq y$ ,  $x+y \leq 1$ ) で構成し、その組成は特に問うものではないが、好ましくはn型 $\text{GaN}$ 、若しくは $y$ 値が0.1以下の $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ とするとn電極10と良好なオーミックが得られやすい。n型不純物濃度は $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ の範囲、さらに好ましくは、 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ に調整することが望ましい。 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも小さいとn電極の材料と好ましいオーミックが得られにくくなるので、レーザ素子では閾値電流、電圧の低下が望めず、 $1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ よりも大きいと、素子自体のリーク電流が多くなったり、また結晶性も悪くなるため、素子の寿命が短くなる傾向にある。n側コンタクト層3の膜厚は $0.2\mu\text{m}$ 以上、 $4\mu\text{m}$ 以下に調整することが望ましい。 $0.2\mu\text{m}$ よりも薄いと、n電極10を形成する際に、n側コンタクト層2の表面を露出させるようにエッチングレートを制御するのが難しく、一方、 $4\mu\text{m}$ 以上にすると不純物の影響で結晶性が悪くなる傾向にある。また、このn側コンタクト層2を、例えば $\text{InGaIn}/\text{InGaIn}$ (但し $\text{In}$ 組成比は異なる。)、 $\text{InGaIn}/\text{GaN}$ 、 $\text{InGaIn}/\text{AlGaIn}$ 、 $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ 等の組み合わせによる超格子構造としても良い。なお、図3に示すように、基板1に $\text{GaN}$ のような導電性基板を使用して、基板側にn電極を設けた場合にはコンタクト層としては作用せず、バッファ層として作用する。

【0021】n側クラッド層3は、光閉じ込め、キャリア閉じ込め層として作用し、バンドギャップエネルギーの大きな第1の窒化物半導体層と、第1の窒化物半導体層よりもバンドギャップエネルギーの小さな第2の窒化物半導体層とが積層されて、互いに不純物濃度が異なる

超格子構造のn側クラッド層3を有している。さらに第1の窒化物半導体層は少なくともAlを含む窒化物半導体、好ましくは $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x \leq 1$ ) を成長させる方が望ましい。一方、第2の窒化物半導体は第1の窒化物半導体よりもバンドギャップエネルギーが小さい窒化物半導体であればどのようなものでも良いが、好ましくは $Al_yGa_{1-y}N$  ( $0 \leq y < 1, x > y$ )、 $In_zGa_{1-z}N$  ( $0 \leq z < 1$ ) のような2元混晶、3元混晶の窒化物半導体が成長させやすく、また結晶性の良いものが得られやすい。その中でも特に好ましくは第1の窒化物半導体は実質的にIn、Gaを含まない $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x < 1$ ) とし、第2の窒化物半導体は実質的にAlを含まない $In_zGa_{1-z}N$  ( $0 \leq z < 1$ ) とし、中でも結晶性に優れた超格子を得る目的で、Al混晶比(Y値) 0.3以下の $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x \leq 0.3$ ) と、GaNの組み合わせが最も好ましい。第1の、第2の窒化物半導体層の各膜厚は100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは10~40オングストロームの膜厚に調整する。100オングストロームよりも厚いと、窒化物半導体層が弾性歪み限界以上の膜厚となり、膜中に微小クラック、あるいは結晶欠陥が入りやすい傾向にある。膜厚下限は特に限定せず、1原子層以上であればよいが、10オングストローム以上が最も好ましい。

【0022】キャリア閉じ込め層としてクラッド層を形成する場合、活性層よりもバンドギャップエネルギーの大きい窒化物半導体を成長させる必要がある。バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層とは、即ちAl混晶比の高い窒化物半導体である。従来ではAl混晶比の高い窒化物半導体を厚膜で成長させると、クラックが入りやすくなるため、結晶成長が非常に難しかったが、本発明のように歪み超格子層にすると、歪み超格子層を構成する単一層をAl混晶比の高い層としても、弾性臨界膜厚以下の膜厚で成長させているのでクラックが入りにくい。そのため、Al混晶比の高い層を結晶性良く成長できることにより、光閉じ込め、キャリア閉じ込め効果が高くなり、特に面発光レーザ素子に適用すると閾値電圧、閾値電流を低下させる上で有利である。

【0023】さらにこのn側クラッド層を超格子層とする場合、超格子層にn型不純物を変調ドーピングすることが望ましい。変調ドーピングとは、超格子層を構成するバンドギャップエネルギーの大きな第1の窒化物半導体層とバンドギャップエネルギーの小さな第2の窒化物半導体層とのn型不純物濃度が異なることで、一方の層のn型不純物濃度を小さく、好ましくは不純物をドーピングしない状態(アンドープ)として、もう一方を高濃度にドーピングすると、閾値電圧、V<sub>f</sub>等を低下させることができる。これは不純物濃度の低い層を歪み超格子層中に存在させることにより、その層の移動度が大きくなり、また不純物濃度が高濃度の層も同時に存在することにより、キャリア

濃度が高いままで歪み超格子層が形成できることによる。つまり不純物濃度が低い移動度の高い層と、不純物濃度が高いキャリア濃度が大きい層とが同時に存在することにより、キャリア濃度が大きく、移動度も大きい層n側クラッド層となるために、閾値電圧、V<sub>f</sub>が低下すると推察される。

【0024】バンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層に高濃度に不純物をドーピングした場合、この変調ドーピングにより高不純物濃度層と、低不純物濃度層との間に二次元電子ガスができ、この二次元電子ガスの影響により抵抗率が低下すると推察される。例えば、n型不純物がドーピングされたバンドギャップの大きい窒化物半導体層と、バンドギャップが小さいアンドープの窒化物半導体層とを積層した超格子層では、n型不純物を添加した層と、アンドープの層とのヘテロ接合界面で、障壁層側が空乏化し、バンドギャップの小さい層側の厚さ前後の界面に電子(二次元電子ガス)が蓄積する。この二次元電子ガスがバンドギャップの小さい側にできるので、電子が走行するときに不純物による散乱を受けないため、超格子の電子の移動度が高くなり、抵抗率が低下する。なおp側の変調ドーピングも同様に二次元正孔ガスの影響によると推察される。またp層の場合、AlGa<sub>1-x</sub>NはGaNに比較して抵抗率が高い。そこでAlGa<sub>1-x</sub>Nの方にp型不純物を多くドーピングすることにより抵抗率が低下するために、超格子層の実質的な抵抗率が低下するので素子を作製した場合に、閾値が低下する傾向にあると推察される。

【0025】一方、バンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層に高濃度に不純物をドーピングした場合、以下のような作用があると推察される。例えばAlGa<sub>1-x</sub>N層とGaN層にMgを同量でドーピングした場合、AlGa<sub>1-x</sub>N層ではMgのアクセプター準位の深さが大きく、活性化率が小さい。一方、GaN層のアクセプター準位の深さはAlGa<sub>1-x</sub>N層に比べて浅く、Mgの活性化率は高い。例えばMgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドーピングしてもGaNでは $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 程度のキャリア濃度であるのに対し、AlGa<sub>1-x</sub>Nでは $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 程度のキャリア濃度しか得られない。そこで、本発明ではAlGa<sub>1-x</sub>N/GaNとで超格子とし、高キャリア濃度が得られるGaN層の方に多く不純物をドーピングすることにより、高キャリア濃度の超格子が得られるものである。しかも超格子としているため、トンネル効果でキャリアは不純物濃度の少ないAlGa<sub>1-x</sub>N層を移動するため、実質的にキャリアはAlGa<sub>1-x</sub>N層の作用は受けず、AlGa<sub>1-x</sub>N層はバンドギャップエネルギーの高いクラッド層として作用する。従って、バンドギャップエネルギーの小さな方の窒化物半導体層に不純物を多くドーピングしても、レーザ素子、LED素子の閾値を低下させる上で非常に効果的である。なおこの説明はp型層側に超格子を形成する例について説明したが、n層側に超格子を形成する場合において

も、同様の効果がある。

【0026】バンドギャップエネルギーが大きい第1の窒化物半導体層にn型不純物を多くドーピングする場合、第1の窒化物半導体層への好ましいドーピング量としては、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 、さらに好ましくは $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲に調整する。 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ よりも少ないと、第2の窒化物半導体層との差が少なくなつて、キャリア濃度の大きい層が得られにくい傾向にあり、また $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ よりも多いと、素子自体のリーク電流が多くなりやすい傾向にある。一方、第2の窒化物半導体層のn型不純物濃度は第1の窒化物半導体層よりも少なければ良く、好ましくは $1/10$ 以上少ない方が望ましい。最も好ましくはアンドープとすると最も移動度の高い層が得られるが、膜厚が薄いため、第1の窒化物半導体側から拡散してくるn型不純物があり、その量は $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以下が望ましい。n型不純物としてはSi、Ge、Se、S、O等の周期律表第IVB族、VIB族元素を選択し、好ましくはSi、Ge、Sをn型不純物とする。この作用は、バンドギャップエネルギーが大きい第1の窒化物半導体層にn型不純物を少なくドーピングして、バンドギャップエネルギーが小さい第2の窒化物半導体層にn型不純物を多くドーピングする場合と同様である。以上、超格子層に不純物を好ましく変調ドーピングする場合について述べたが、バンドギャップエネルギーが大きい窒化物半導体層とバンドギャップエネルギーが小さい窒化物半導体層との不純物濃度を等しくすることもできる。

【0027】活性層4はInを含む窒化物半導体、好ましくは $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x \leq 1$ ) よりなる井戸層と、井戸層よりもバンドギャップエネルギーが大きい窒化物半導体よりなる障壁層とを積層した多重量子井戸構造とすることが望ましい。井戸層の好ましい膜厚は100オングストローム以下、さらに望ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは50オングストローム以下に調整する。障壁層は150オングストローム以下、さらに好ましくは100オングストローム以下、最も好ましくは70オングストローム以下に調整する。

【0028】p側クラッド層5もn側クラッド層3と同じく、光閉じ込め、キャリア閉じ込め層として作用し、バンドギャップエネルギーの大きい第3の窒化物半導体層と、第3の窒化物半導体層よりもバンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体層とが積層されて、互いの不純物濃度が異なる超格子構造のp側クラッド層5を有している。このp側クラッド層5の超格子層を構成する第3、第4の窒化物半導体層の膜厚も、n側クラッド層3と同じく、100オングストローム以下、さらに好ましくは70オングストローム以下、最も好ましくは10～40オングストロームの膜厚に調整する。同様に、第3の窒化物半導体層は少なくともAlを含む窒化物半導体、好ましくは $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x \leq 1$ ) を

成長させることが望ましく、第4の窒化物半導体は好ましくは $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 \leq x < 1$ ,  $x > y$ )、 $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  ( $0 \leq z \leq 1$ ) のような2元混晶、3元混晶の窒化物半導体を成長させることが望ましい。

【0029】p側クラッド層5を超格子構造とすると、超格子構造が発光素子に与える作用は、n側クラッド層3の作用と同じであるが、さらにn層側に形成した場合に加えて次のような作用がある。即ち、p型窒化物半導体はn型窒化物半導体に比べて、通常抵抗率が2桁以上高い。そのため超格子層をp層側に形成することにより、Vfの低下が顕著に現れる。詳しく説明すると窒化物半導体はp型結晶が非常に得られにくい半導体であることが知られている。p型結晶を得るためp型不純物をドーピングした窒化物半導体層をアニーリングして、水素を除去する技術が知られている（特許第2540791号）。しかしp型が得られたといってもその抵抗率は数 $\Omega \cdot \text{cm}$ 以上もある。そこで、このp型層を超格子層とすることにより結晶性が良くなり、抵抗率が1桁以上低下するためVfの低下が現れやすい。

【0030】p側クラッド層5の第3の窒化物半導体層と第4の窒化物半導体層とのp型不純物濃度が異なり、一方の層の不純物濃度を大きく、もう一方の層の不純物濃度を小さくする。n側クラッド層3と同様に、バンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体層の方のp型不純物濃度を大きくして、バンドギャップエネルギーの小さな第4のp型不純物濃度を小さく、好ましくはアンドープとすると、閾値電圧、Vf等を低下させることができる。またその逆でも良い。つまりバンドギャップエネルギーの大きな第3の窒化物半導体層のp型不純物濃度を小さくして、バンドギャップエネルギーの小さな第4の窒化物半導体層のp型不純物濃度を大きくしても良い。理由は先に述べたとおりである。

【0031】第3の窒化物半導体層への好ましいドーピング量としては $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 、さらに好ましくは $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ の範囲に調整する。 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ よりも少ないと、同様に第4の窒化物半導体層との差が少なくなつて、同様にキャリア濃度の大きい層が得られにくい傾向にあり、また $1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ よりも多いと、結晶性が悪くなる傾向にある。一方、第4の窒化物半導体層のp型不純物濃度は第3の窒化物半導体層よりも少なければ良く、好ましくは $1/10$ 以上少ない方が望ましい。最も好ましくはアンドープとすると最も移動度の高い層が得られるが、膜厚が薄いため、第3の窒化物半導体側から拡散してくるp型不純物があり、その量は $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以下が望ましい。p型不純物としてはMg、Zn、Ca、Be等の周期律表第IIA族、IIB族元素を選択し、好ましくはMg、Ca等をp型不純物とする。この作用は、バンドギャップエネルギーが大きい第3の窒化物半導体層にp型不純物を少なくドーピングして、バンドギャップエネルギー



一が小さい第4の窒化物半導体層にp型不純物を多くドーピングする場合も同様である。

【0032】さらにまた超格子を構成する窒化物半導体層において、不純物が高濃度にドーピングされる層は、厚さ方向に対し、半導体層中心部近傍の不純物濃度が大きく、両端部近傍の不純物濃度が小さい（好ましくはアンドープ）とすることが望ましい。具体的に説明すると、例えばn型不純物としてSiをドーピングしたAlGaInと、アンドープのGaN層とで超格子層を形成した場合、AlGaInはSiをドーピングしているのでドナーとして電子を伝導帯に出すが、電子はポテンシャルの低いGaNの伝導帯に落ちる。GaN結晶中にはドナー不純物をドーピングしていないので、不純物によるキャリアの散乱を受けない。そのため電子は容易にGaN結晶中を動くことができ、実質的な電子の移動度が高くなる。これは前述した二次元電子ガスの効果と類似しており、電子横方向の実質的な移動度が高くなり、抵抗率が小さくなる。さらに、バンドギャップエネルギーの大きいAlGaInの中心領域にn型不純物を高濃度にドーピングすると効果はさらに大きくなる。即ちGaN中を移動する電子によつては、AlGaIn中に含まれるn型不純物イオン（この場合Si）の散乱を多少とも受ける。しかしAlGaIn層の厚さ方向に対して両端部をアンドープとするとSiの散乱を受けにくくなるので、さらにアンドープGaN層の移動度が向上するのである。作用は若干異なるが、p層側の第3の窒化物半導体層と第4の窒化物半導体層とで超格子を構成した場合も類似した効果があり、バンドギャップエネルギーの大きい第3の窒化物半導体層の中心領域に、p型不純物を多くドーピングし、両端部を少なくするか、あるいはアンドープとすることが望ましい。一方、バンドギャップエネルギーの小さな窒化物半導体層にn型不純物を多くドーピングした層を、前記不純物濃度の構成とすることもできる。超格子層は、少なくともp側層にあることが好ましく、p側層に超格子層があるとより閾値が低下し好ましい。

【0033】第1の電流阻止層6、第2の電流阻止層7はn-p逆接合を有する窒化物半導体で形成する。つまり、第1の電流阻止層6をp型窒化物半導体層で形成し、第2の電流阻止層7をn型窒化物半導体で形成する。第1、第2の電流阻止層の構成としては、活性層の発光を横方向にも閉じ込める目的で形成するため、少なくともAlを含む窒化物半導体、好ましくはAl<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>In<sub>1-y</sub>N<sub>1-z</sub>N（0<Y≤1）で形成することが望ましい。特にAl混晶比（Y値）が0.4以上の窒化物半導体を成長させると、高抵抗なi型になる性質があるので、この性質を利用して、Al混晶比の高いi型の窒化物半導体を成長させてもよい。i型の窒化物半導体を成長させる場合には、特に第1の電流阻止層と第2の電流阻止層とで逆n-p接合を作らなくとも、高抵抗な第1の電流阻止層のみでもよい。またこの電流阻止層はSiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、

ZrO<sub>2</sub>のような絶縁性材料で形成することもできる。

【0034】p側コンタクト層8はp型のIn<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>1-y-z</sub>N（0≤X、0≤Y、X+Y≤1）で構成することができ、好ましくはMgをドーピングしたGaN、若しくはMgをドーピングしたY値が0.1以下のAl<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>In<sub>1-y</sub>Nとすれば、p電極9と最も好ましいオーミック接触が得られる。p側コンタクト層8の膜厚は500オングストローム以下、さらに好ましくは300オングストローム以下、最も好ましくは200オングストローム以下に調整することが望ましい。なぜなら、抵抗率が高いp型窒化物半導体層の膜厚を500オングストローム以下に調整することにより、さらに抵抗率が低下するため、閾値での電流、電圧が低下する。またアニール時にp型層から除去される水素が多くなって抵抗率が低下しやすい傾向にある。

【0035】基板1の第2の主面側に孔100を形成するには、例えば孔の部分を除いて保護膜を第2の主面側に形成した後、エッチングすることで実現できる。エッチング手段としては、大別してウエットエッチング、ドライエッチングがあるが、好ましくはドライエッチングを用いる。ドライエッチングとしては、例えば、反応性イオンエッチング（RIE）、反応性イオンビームエッチング（RIBE）、電子サイクロトロンエッチング（ECR）、イオンビームエッチング等の装置があるが、基板の材料に応じて適宜、エッチング装置、エッチングガス等の条件を選択すればよい。

#### 【0036】

【実施例】図4～図7は本発明の実施例において得られるレーザ素子の構造を示す模式的な断面図である。以下、これらの図面を元に本発明のレーザ素子の製造方法について、順に説明する。

【0037】【実施例1】まずスピネル（111）面を主面とする基板1を用意し、この基板1の上にMOVPE法を用いて500℃でGaNよりなるバッファ層を200オングストロームの膜厚で成長させ、次に1050℃でSiを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドーピングしたn型GaN層を4μmの膜厚で成長させる。

【0038】次に同じく1050℃でSiを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドーピングしたn型Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nよりなる第1の層を40オングストローム成長させ、続いてアンドープ（undoped）GaNよりなる第2の層を40オングストロームの膜厚で成長させる。これらの操作をそれぞれ25回繰り返し、歪み超格子構造よりなるn側クラッド層3を0.2μmの膜厚で成長させる。

【0039】次に温度を800℃にして、アンドープIn<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Nよりなる井戸層を25オングストロームの膜厚で成長させ、続いてアンドープIn<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>Nよりなる障壁層を50オングストロームの膜厚で成長させる。この操作を2回繰り返し、最後に井戸層を積層した総膜厚175オングストロームの多重量子井戸構造

(MQW)の活性層4を成長させる。活性層4は本実施例のようにアンドープでもよいし、またn型不純物及び／又はp型不純物をドーピングしても良い。不純物は井戸層、障壁層両方にドーピングしても良く、いずれか一方にドーピングしてもよい。

【0040】次に温度を1050℃にして、Mgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドーピングしたp型Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nよりなる第3の層を40オングストローム成長させ、続いてアンドープ(undoped)GaNよりなる第4の層を40オングストロームの膜厚で成長させる。これらの操作をそれぞれ25回繰り返す、歪み超格子構造よりなるp側クラッド層5を0.2μmの膜厚で成長させる。

【0041】p側クラッド層5成長後、ウェーハを反応容器から取りだし、SiO<sub>2</sub>よりなる4μmφの保護膜20を所定の位置に複数形成する。保護膜20形成後のウェーハの部分的な断面図が図4である。

【0042】保護膜20形成後、ウェーハをRIE装置に移送し、保護膜を形成していない部分の窒化物半導体層をエッチングし、n側コンタクト層2の表面を露出させる。エッチング後のウェーハの構造を示す断面図が図5である。

【0043】エッチング後、保護膜を形成したまま、再度ウェーハをMOVPE反応容器に移送し、1050℃で露出させたn側コンタクト層2の表面にZnを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドーピングしたAl<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nよりなる第1の電流阻止層6を0.21μmの膜厚で成長させ、続いてSiを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドーピングしたAl<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nよりなる第2の電流阻止層を0.21μmの膜厚で成長させる。第1の電流阻止層はp型不純物としてZnをドーピングしている。ZnはMgに比べて活性化率が低く、p型になりにくい性質を有しており、しかもAl混晶比が高いため、第1の電流阻止層は半絶縁性に近い。成長後のウェーハの構造を示す図が図6である。

【0044】電流阻止層6、7成長後、ウェーハを反応容器から取りだし、保護膜20を酸で除去した後、再び反応容器内にて、1050℃で第2の電流阻止層7、p側クラッド層5の表面にMgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドーピングしたp型GaNよりなるp側コンタクト層7を200オングストロームの膜厚で成長させる。成長後のウェーハの構造を示す断面図が図7である。

【0045】以上のようにして窒化物半導体を成長したウェーハを反応容器から取りだし、窒化物半導体を成長していない側の基板1の所定の位置に保護膜を形成し、保護膜を形成していない部分をエッチングして、図8に示すように20μmφの孔100を形成する。孔100の深さは孔100の底部と、n側クラッド層3との距離とが0.5μmとなるように調整する。

【0046】孔100形成後ウェーハをCVD装置に移送し、SiO<sub>2</sub>とTiO<sub>2</sub>との誘電体多層膜からなる第1の反射鏡11を、図8に示すように孔100の底部に形

成する。一方、p側コンタクト層8の表面にも所定の形状の保護膜を形成して、図8に示すように20μmφの第2の反射鏡12を形成する。これらの反射鏡は410nmの発光波長に対して80%以上の反射率を有するように設計されている。

【0047】次に、所定の形状のマスクを形成して、p側コンタクト層8側からエッチングを行い、n側コンタクト層2の表面を露出させ、露出したn側コンタクト層2にはTi/Alよりなるn電極10を形成し、一方最上層のp側コンタクト層8の表面の第2の反射鏡12を除くほぼ全面にNi/Auよりなるp電極9を形成する。電極形成後の構造を示す断面図が図1、平面図が図2である。以上のようにして以上のようにして作製した面発光レーザ素子は、従来の電極ストライプ型の窒化物半導体レーザ素子に比較して、約1/30の電流で408nmの室温連続発振を示し、寿命は1分以上であった。

【0048】[実施例2] 実施例2は図3を元に説明する。サファイア基板の上に成長させた60μmの厚さを有する $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$  SiドーピングGaN基板1'を用意する。このGaN基板1'の上にMOVPE装置を用いて、1050℃でSiを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドーピングしたGaNよりなるバッファ層2'を1μmの膜厚で成長させる。なおこのバッファ層2'は実施例1において500℃の低温で成長したバッファ層とは区別される。

【0049】このバッファ層2'の上に先ほどと同様に、超格子構造よりなるn側クラッド層3、活性層4、p側クラッド層5、第1の電流阻止層6、第2の電流阻止層7、p側コンタクト層8を成長させる。

【0050】p側コンタクト層8成長後、サファイア基板を研磨により除去し、GaN基板1'の表面を露出させる。その後実施例1と同様に、GaN基板1'の第2の主面側に20μmφの孔100を設ける。なお孔100の底部の距離と、n側クラッド層3との距離は0.1μmに調整する。次に、孔100の底部に誘電体多層膜よりなる第1の反射鏡を形成し、p側コンタクト層の表面にも20μmφの誘電体多層膜よりなる第2の反射鏡を形成する。

【0051】次に研磨により露出したGaN基板1'のほぼ全面にTi/Alよりなるn電極を設け、実施例1と同様にレーザ発振させたところ、実施例1とほぼ同等の条件においてレーザ発振を示し、寿命は10分以上であった。

【0052】[実施例3] 実施例1において、n側クラッド層3成長時に、Siを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドーピングしたGaNよりなる第2の層を40オングストロームと、アンドープのAl<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nよりなる第1の層を40オングストローム成長させて、このペアを25回成長させ、総膜厚0.2μm(2000オングストローム)の超格子構造よりなるn側クラッド層3を成長させ、ま

10

20

30

40

50

た、p側クラッド層5成長時に、Mgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープしたGa<sub>0.9</sub>Nよりなる第4の層を40オングストロームと、アンドープのAl<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>Nよりなる第3の層を40オングストローム成長させて、このペアを25回成長させ、総膜厚0.2 $\mu\text{m}$ (2000オングストローム)の超格子構造よりなるp側クラッド層5を成長させる他は実施例1と同様にしてレーザ素子を得たところ、実施例1とほぼ同様に良好な結果が得られた。

### 【0053】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると窒化物半導体よりなる面発光レーザ素子が実現できる。面発光レーザ素子は基板と垂直な面に発光し、LEDのように横方向の光の漏れがほとんどない。そのため、一枚のウェーハに複数の活性領域を作製することにより半導体ウェーハで面状光源ができる。特に窒化物半導体レーザ素子は380nm～450nmの紫、青色発光領域を主としているため、このレーザ素子の発光面側に、例えば青色発光で励起されて、黄色～オレンジ色に発光する蛍光物質を配置すると、白色発光が得られる。この白色発光を蛍光灯に変わる光源として利用すると、省エネルギーで効率の高い光源が得られる。このように面発光レーザ素子を実現することは非常に産業上有用である。

### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の一実施例に係るレーザ素子の構造を示す模式断面図。

【図2】 図1のレーザ素子をp電極側から見た平面図。

\*

\*【図3】 本発明の他の実施例に係るレーザ素子の構造を示す模式断面図。

【図4】 本発明の方法の一工程において得られる窒化物半導体ウェーハの構造を示す模式断面図。

【図5】 本発明の方法の一工程において得られる窒化物半導体ウェーハの構造を示す模式断面図。

【図6】 本発明の方法の一工程において得られる窒化物半導体ウェーハの構造を示す模式断面図。

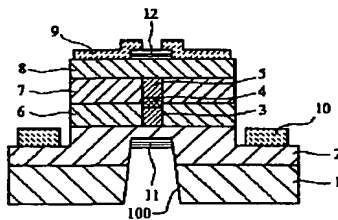
【図7】 本発明の方法の一工程において得られる窒化物半導体ウェーハの構造を示す模式断面図。

【図8】 本発明の方法の一工程において得られる窒化物半導体ウェーハの構造を示す模式断面図。

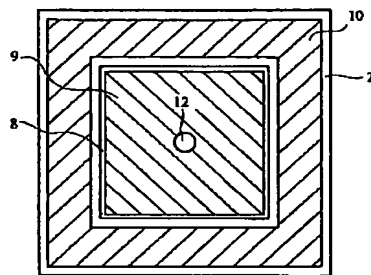
### 【符号の説明】

- 1・・・基板
- 2・・・n側コンタクト層
- 3・・・n側クラッド層
- 4・・・活性層
- 5・・・p側クラッド層
- 6・・・第1の電流阻止層
- 7・・・第2の電流阻止層
- 8・・・p側コンタクト層
- 9・・・p電極
- 10・・・n電極
- 11・・・第1の反射鏡
- 12・・・第2の反射鏡
- 100・・・孔

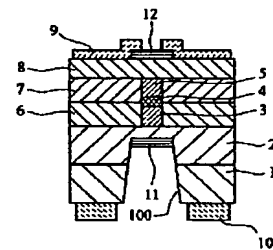
【図1】



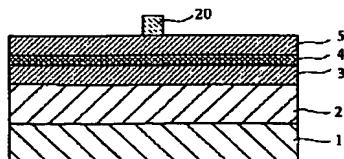
【図2】



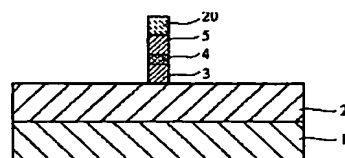
【図3】



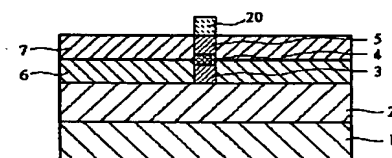
【図4】



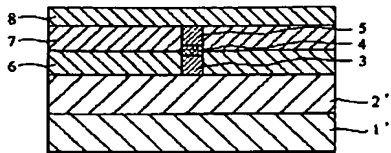
【図5】



【図6】



【図 7】



【図 8】

